УДК 620.22:661.666 DOI: https://doi.org/10.26661/2071-3789-2021-1-06

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-4447-4641
Карпенко Ганна Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-3504-0283
Нестеренко Тетяна Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-7900-8512
Кириченко Олексій Геннадійович, завідувач кафедрою, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-3032-1919
Румянцев Володислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-3182-2536
Воляр Роман Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-3182-2536

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАРБОНІЗАЦІЇ НИЗЬКОЩІЛЬНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТІВ ЗА ТЕРМОХІМІЧНОГО ЗМІНЮВАННЯ ЇХ КОМПОНЕНТІВ

Під час карбонізації вуглецевих композитів відбуваються складні фізико-хімічні перетворення в об'ємі полімерної матриці та утворювачів пор зі створенням коксового залишку, а також виділення летких газоподібних речовин різного хімічного складу. Встановлено, що об'ємні та лінійні усадки феноло-формальдегідної смоли за карбонізації мають три характеристичні температурні інтервали. За карбонізації смоли до температури 673 К спостерігають незначне збільшення значень усадки, з підвищенням температури до 873 К зафіксовано різке збільшення її значень, а за наступного підвищення температури до 1073 К змінювання усадки має плавніший характер. Результати визначення модулів пружності волокнистих матеріалів і вспіненого порошку феноло-формальдегідної смоли показали, що його значення з підвищенням температури поступово зменшується і за температури 1200 К має практично постійну та мінімальну величину. Експерименти щодо визначення характеристик міцності компонентів суспензії дали змогу встановити, що з підвищенням температури відбувається поступове пониження зазначених характеристик, які за температури 1273 К стають достатніми для забезпечення міцності кінцевого матеріалу. Змінювання усадки низькощільного вуглецевого композиту зумовлено термохімічними перетвореннями, що відбуваються з його компонентами у процесі карбонізації. До температури 500 К відбуваються змінювання в матеріалах-утворювачах пор, з подальшим підвищенням температури починають виділятися газоподібні речовини як результат перетворення матричного матеріалу (феноло-формальдегідної смоли) на полімер сітчастої структури. Міцність композиту під час карбонізації різко змінюється за температури вище ніж 400 К і досягає свого максимального значення ~ 1,2 МПа за температури 900 К.

Ключові слова: вуглецеві композити, полімерна матриця, створювачі пор, карбонізація, об’ємні та лінійні усадки, модуль пружності, характеристики міцності, експериментальні та розрахункові дослідження

Вступ. Проблема формування карбонізованих вуглецевих композитів із заданою структурою та фізико-механічними властивостями є актуальною, а методи розрахунків технологічних режимів одержання зазначених матеріалів мають безперечний науковий інтерес [1–3].

© В.О. Скачков, Г.В. Карпенко, Т.М. Нестеренко,
О.Г. Кириченко, В.Р. Румянцев, Р.М. Воляр, 2021.

Одним з ефективних методів створення в об'ємі карбонізованих вуглецевих композитів заданої пористості є уведення до їх об'єму матеріалів-утворювачів пор, які характеризуються низьким коксовим залишком, визначальним розміром, формою та розташуванням пор. Під час сокарбонізації вуглецевих волокон, феноло-формальдегідної матриці та утворювачів пор формується необхідна структура одержаних карбонізованих вуглецевих композитів [4].

Постановка завдання. Виконати експериментально-розрахункове дослідження параметрів процесу карбонізації нізькощільних вуглецевих композитів, а також низки фізико-механічних характеристик карбонізованих композитів.

Головна частина досліджень. Під час карбонізації вуглецевих композитів відбуваються складні фізико-хімічні перетворення в об'ємі полімерної матриці та утворювачів пор зі створення коксового залишку. Одночасно виділяються леткі газоподібні речовини різного хімічного складу та реалізуються процеси термохімічної усадки, температурного поширення й утворення пор. Така різманітність процесів зумовлює створення мікротріщин, мікропор і формування поля структурних напружень.

Для розрахунків зазначених процесів можливим є використання методів мікромеханіки композитів [5,6]. При цьому класичні підходи мікромеханіки композитів доповнюють урахуванням процесів руйнування та змінювання властивостей компонентів, як результат механічних навантажень, так і дії температури.

Моделювання процесу карбонізації базується на представленні вуглецевих композитів мікронеоднородним середовищем класу B_2. Для модельного середовища зі змінюваними властивостями у процесі термічної обробки фізичні рівняння можна подати у такому вигляді:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^{N} Q_{ij\alpha\beta}^{k} \cdot \left(1-\omega^{k}\right) \cdot \lambda_{k} \cdot \left[\varepsilon_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^{N} b_{\alpha\beta}^{k} \cdot \left(1-\psi^{k}\right) \cdot \lambda_{k} \cdot \Delta T \right], \quad (1)$$

де ξ_{ij}, ε_{ij} – мікроструктурні напруження та деформації відповідно; $Q_{ij\alpha\beta}^{k}$ – випадкові модулі пружності k-го компонента вуглецевого композиту; ω^k – випадкові термоструктурні функції, які встановлюють залежність пружних властивостей компонентів композиту від міри структурних перетворень за температури T; b_{ij}^{k} – випадкові коефіцієнти термічного розширення k-го компонента; ψ^k – випадкові функції, що мають термічну усадку та встановлюють залежність термохімічної усадки k-го компонента від температури карбонізації; T – температура карбонізації; N – кількість компонентів у вуглецевому композиті; λ_k – випадкова індикаторна функція.

Для рівняння (1) розроблено методику побудови випадкових термоструктурних функцій ω^k, яку представляють у вигляді добутку двох випадкових функцій, одна з яких характеризує процес утворення дефектів, а друга – змінювання пружних характеристик компонентів вуглецевого композиту за температури процесу.

Визначення параметрів випадкових термоструктурних функцій ψ^k базується на використанні розрахунково-експериментального метода, для якого потрібно експериментальним шляхом встановити термохімічні усадки кожного компонента вуглецевого композиту.

Для оцінки змінювання властивостей вуглецевих композитів у процесі карбонізації побудовано математичну модель такого процесу [7]. Модель заснована на розв'язанні статистичної крайової задачі мікромеханіки композиційних матеріалів, яка дає змогу визначати мікроструктурні напруження й оцінювати рівень мікроструктурних перетворень, змінювання властивостей і коефіцієнтів термохімічної усадки у компонентах композита (вуглецевих волокнах, утворювачів пор і матриці).

Розроблена модель дає змогу з використанням спеціально створеної програми виконувати вибирання й обробку експериментальних даних, визначати середні значення та

дисперсії мікронапружень у компонентах вуглецевих композиційних матеріалів, виконувати оцінку пошкодження компонентів, а також оцінювати змінювання пружних властивостей, коефіцієнтів термохімічної усадки та лінійного термічного розширення композиту для довільних температур карбонізації вуглецевих композитів залежно від рівня діючої температури.

Уведення до суспензії, що готують, разом з вуглецевим волокном, порошком феноло-формальдегідної смоли та порошком вспіненого форполімера, органічних наповнювачів як утворювачів пор дає змогу регулювати щільність і пористість вуглецевих композитів. За введенням наповнювача волокнистої структури пори після карбонізації, як правило, стають транспортними [8–10].

Під час додавання утворювачів пор у вигляді гранул або порошку після карбонізації утворюються пори сферичної форми. Відомо, що наявність пористості у вуглецевих матеріалах суттєво впливає на їх фізико-механічні властивості (міцність, модуль пружності, електроопір, теплопровідність та ін.).

Як органічні наповнювачі для досліджень було вибрано утворювачі пор, що мають низький коксовий залишок та дають змогу одержувати з використанням методу зливання водної суспензії вуглецеві композити з щільністю до 0,2 г/см^3. Залежно від вибраного створювача пор у кінцевому матеріалі створюються пори різного розміру, форми та призначення.

На першому етапі досліджень вивчали різні органічні матеріали – бавовняні, поліетиленові та віскозні волокна.

Наважки підготовлених волокон піддавали карбонізації без доступу повітря за температури 1123 К за наступним режимом [8]:

– нагрівання у печі до температури 773 К;
– витримка у печі протягом однієї години;
– наступне нагрівання до температури 1123 К;
– витримка у печі протягом однієї години;
– охолодження з піччю.

У табл. 1 подано дані про щільність матеріалів і втрати маси досліджених зразків після завершення процесу карбонізації.

Таблиця 1 – Властивості досліджених матеріалів

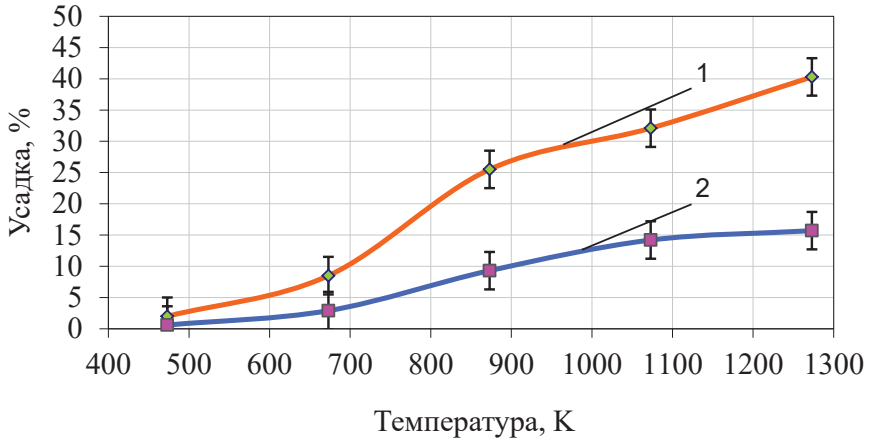
Матеріал	Щільність, кг/м^3	Втрата маси за карбонізації, %
бавовняні волокна	1,54...1,56	81,0
поліетиленові волокна	0,90	82,0
віскозні волокна	1,52	83,5

У процесі сокарбонізації вуглецевих волокон, феноло-формальдегідної матриці й утворювачів пор феноло-формальдегідна матриця змінює свої фізико-механічні характеристики.

Дослідження фізико-механічних перетворень у феноло-формальдегідній матриці виконували в середовищі захисного газу (азоту) зі швидкістю нагрівання 6…8 К/хв. до температури 1273 К. Усадку зразків визначали періодично через кожних 100 К.

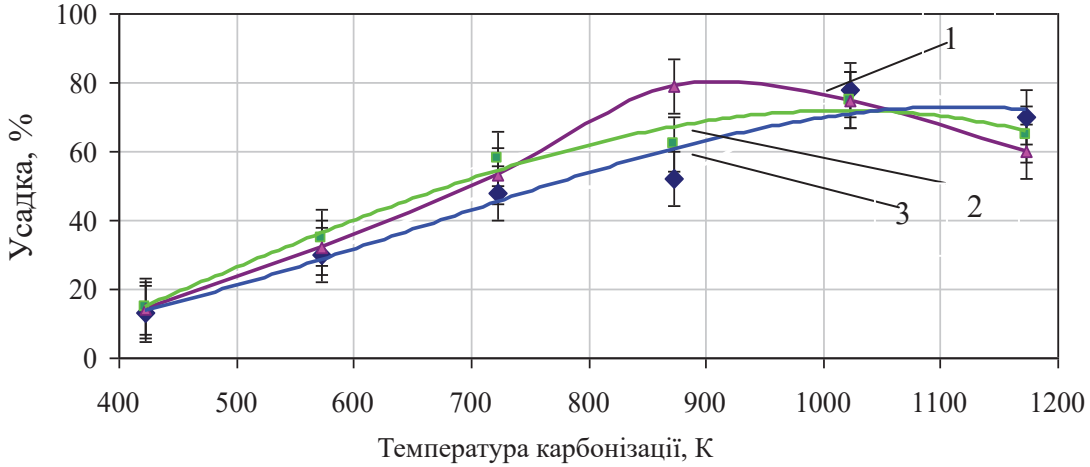
На рис. 1 представлено об’ємні та лінійні усадки феноло-формальдегідної смоли у процесі карбонізації.

Як видно, об’ємні та лінійні усадки феноло-формальдегідної смоли під час карбонізації мають три характеристичні температурні інтервали. За карбонізації смоли до температури 673 К спостерігають незначне збільшення значень усадки, з підвищенням температури до 873 К зафіксовано різке збільшення її значень. Під час наступного підвищення температури до 1073 К змінювання усадки має плавніший характер.



1 – об'ємні усадки; 2 – лінійні усадки
Рисунок 1 – Усадка затверділої феноло-формальдегідної смоли у процесі карбонізації

Для визначення параметрів усадки матеріалів, що створюють пори, їх піддавали карбонізації в середовищі захисного газу зі швидкістю нагрівання 6…8 К/хв. до температури 1123 К за вищенаведеним режимом. Усадку зразків визначали періодично через кожних 100 К (рис. 2).



1 – поліетиленові волокна; 2 – віскозні волокна; 3 – бавовняні волокна
Рисунок 2 – Усадка утворювачів пор у процесі карбонізації

Результати експериментів дозволили встановити, що усадка всіх досліджених материалов, що утворюють пори, зростає з підвищенням температури. З аналізу кривих, поданих на рис. 1 і 2, встановлено, що параметри термоструктурних функцій компонентів композитів мають значення, що наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри функцій, що мають термічну усадку, для феноло-формальдегідної смоли та матеріалів, що створюють пори, за температури 1173 К

Параметри	Феноло-формальдегідна смола	Бавовняні волокна	Поліетиленові волокна	Віскозні волокна
η_i^k	0,32	0,20	0,10	0,13
Δ_i^k	0,21	0,05	0,04	0,04
γ_i^k	0,04	0,07	0,13	0,09
Y_i^k	0,18	0,03	0,03	0,02

З використанням наведених вище значень параметрів виконували теоретичне визначення усадки вуглецевих композитів за формулами, що наведено у роботі [8]:

$$\left\langle \psi^{k}_{(T)} \right\rangle = \sum_{i=1}^{Q} \eta_i^k \cdot \exp\left[\frac{\Delta_i^k \cdot (T_i - T_n)}{R \cdot T} \right]; \quad (2)$$

$$\left\langle \left(\psi^{0k} \right)^2 \right\rangle = \sum_{i=1}^{Q} \gamma_i^k \cdot \exp\left[\frac{\Upsilon_i^k \cdot (T_i - T_n)}{R^2 \cdot T^2} \right]^2. \quad (3)$$

Визначення динамічного модуля пружності компонентів суспензії здійснювали з використанням приладу УК-10 П. Результати визначення модулів пружності волокнистих матеріалів і вспіненого порошку феноло-формальдегідної смоли (форполімера) наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Змінювання пружних характеристик компонентів суспензії у процесі карбонізації

Компонент композиту	Динамічний модуль пружності, МПа						
	Температура карбонізації, К						
	200	400	600	700	800	1000	1200
1	42	35	23	19	17	8	4
2	49	49	38	28	30	78	140
3	64	39	25	20	17	8	4
4	73	49	38	32	24	15	8

Примітка: 1 – бавовняні волокна; 2 – феноло-формальдегідна смола; 3 – поліетиленові волокна; 4 – віскозні волокна

Встановлено, що величина динамічного модуля пружності матеріалів, що утворюють пори, з підвищенням температури поступово зменшується та за 1200 К має практично постійне та мінімальне значення. Динамічний модуль пружності вспененної феноло-формальдегідної смоли (форполімера) характеризується мінімумом за температури близько 700 К. З наступним підвищенням температури динамічний модуль пружності зростає до 140 МПа.

Результати експериментів щодо визначення характеристик міцності компонентів суспензії наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Змінювання характеристик міцності компонентів суспензії у процесі карбонізації

Компонент композиту	Межа міцності, МПа					
	Температура карбонізації, К					
	500	700	800	900	1100	1300
1	55	41	35	24	15	13
2	68	52	48	50	58	65
3	26	20	19	17	14	12
4	65	38	32	30	28	25

Примітка: 1 – бавовняні волокна; 2 – феноло-формальдегідна смола; 3 – поліетиленові волокна; 4 – віскозні волокна

Як видно, з підвищенням температури спостерігають поступове пониження характеристик міцності компонентів суспензії, які за температури 1273 К стають практично постійними та достатніми для забезпечення міцності кінцевого матеріалу.

Значення межі міцності для вспененного форполімера з підвищенням температури до 800 К знижується, що можна пояснити початком утворення передструктури скловуглецю. За подальшим підвищенням температури його міцність значно зростає чому сприяє утворення жорсткого полімеру сітчастої структури скловуглецю з високою міцністю [10].

За даними табл. 3 і 4 з використанням методу регресійного аналізу визначили значення параметрів термоструктурних функцій компонентів низькощільного вуглецевого композиту, які наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Параметри термоструктурних функцій
для компонентів низькощільного вуглецевого композиту

Параметри	ФФС	Бавовняні волокна	Поліетиленові волокна	Віскозні волокна
φ_i (i = 1)	0,120	0,060	0,540	0,157
Δ_i (i = 1)	0,040	0,045	0,030	0,004
h_i (i = 1)	0,014	0,070	0,021	0,084
f_i (i = 1)	0,021	0,031	0,009	0,0006

Примітка: ФФС – феноло-вормальдегіна смола

Дані таблиць 2–5 дають змогу визначити пружні характеристики та характеристики міцності, а також усадку для низькощільного вуглецевого композиту в процесі карбонізації.

Результати визначення щільності, усадки, межі міцності на стиск та модуля пружності наведено у табл. 6.

Таблиця 6. Розрахункові та експериментальні значення різних властивостей
низькощільного вуглецевого композиту в процесі карбонізації

Температура, К	Щільність, г/см^3	Модуль пружності, МПа		Межа міцності на стиск, МПа		Усадка,%	
		1	2	1	2	1	2
20	0,36	107	100,0	0,22	0,20	0	0
100	0,36	98	100,0	0,18	0,20	0	0
200	0,36	95	100,0	0,17	0,20	0,87	1,00
300	0,33	92	90,0	0,20	0,18	2,25	3,00
400	0,30	96	95,0	0,25	0,25	5,60	5,00
500	0,27	127	130,0	0,45	0,33	9,50	9,00
600	0,25	143	140,0	0,38	0,41	14,20	13,00
700	0,24	190	190,0	0,57	0,68	19,60	21,00
800	0,20	246	250,0	0,88	0,91	23,10	24,00
900	0,20	309	300,0	1,13	1,10	24,40	24,00

Примітка: 1 – розрахункові значення; 2 – експериментальні значення

Результати, що одержано у процесі карбонізації та з використанням математичної моделі для композиційного матеріалу з урахуванням термохімічних перетворень його компонентів (табл. 6), дають змогу прогнозувати властивості одержаного матеріалу.

Так, з підвищенням температури карбонізації модуль пружності низькощільного вуглецевого композиту збільшується. Найбільш різке збільшення його значень відбувається після досягнення температури 873 К.

Змінювання усадки низькощільного вуглецевого композиту зумовлене термохімічними перетвореннями, що відбуваються з його компонентами у процесі карбонізації. До температури 500 К зафіксовано змінюваня у матеріалах, що є утворювачами пор, з подальшим підвищенням температури починають виділятися газоподібні речовини як результат перетворення матричного матеріалу (феноло-формальдегідної смоли) на полімер сітчастої структури. З досягненням температури 1075 К відбувається незначне змінювання усадки матеріалу. Міцність композиту в процесі карбонізації різко змінюється за температури вище ніж 475 К і досягає свого максимального значення ~ 1,2 МПа за температури 900 К.

Висновки. 1. Розрахунково-експериментальним шляхом визначено статистичні параметри випадкових термоструктурних функцій та функцій, які мають термічну усадку для феноло-формальдегидної смоли та матеріалів-утворювачів пор.

2. З використанням математичної моделі виконано розрахунок основних фізико-механічних характеристик низькощільного вуглецевого композиту, які підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

3. Запропоновані співвідношення компонентів дають змогу варіювати значення щільності карбонізованого вуглецевого матеріалу залежно від поставленої мети. Регулюючи вміст компонентів і підбираючи тип утворювача пор, формують необхідну структуру та властивості матеріалу.

Бібліографічний перелік

1. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: справочник / под ред. В.П. Соседова. Москва : Металлургия, 1975. 335 с.

2. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы : справочник. Москва : Металлургия, 1994. 128 с.

3. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Москва : САЙНС-ПРЕСС, 2007. 192 с.

4. Карпенко А.В. Научные основы получения низкоплотных материалов методом разлива из водных суспензий. *Специальные вопросы химии и химической технологии*. 2006. № 5. С. 138–142.

5. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. Минск : БГУ, 1978. 206 с.

6. Соколкин Ю.В., Скачков В.А., Танкеева М.Г. Исследование процессов деформирования и разрушения композитных материалов и конструкций при сложном нагруженном состоянии. Механика конструкций из композиционных материалов. Новосибирск : Наука, 1984. С. 97–101.

7. Скачков В.О., Карпенко Г.В., Грицай В.П., Іванов В.І., Карпенко Н.О. Моделювання процесу карбонізації вуглецевих композиційних матеріалів з утворювачами пор. *Металургія. Наукові праці ЗДІА,* 2005. Вип. 12. С. 80–86.

8. Скачков В.А., Карпенко В.Д., Карпенко А.В., Нестеренко Т.Н. Моделирование процесов сокарбонизации углеродных композиционных материалов с порообразователям : материалы и покрытия в эктремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологи производства и утилизации изделий. Труды конференции. Кацивели-Понизовка, 13-17.09.2004. С. 61.

9. Скачков В.А., Карпенко А.В., Грицай В.П., Печенникова В.М. Изменение свойств углеродных композитов с порообразователями в процессе карбонизации. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докладов 6-й Межд. конф. Харьков, 2005. С. 75–76.

10. Карпенко А.В., Скачков В.А., Фильченков А.С. Модель процесса карбонизации углерод-углеродного композиционного материала. Компьютерне моделювання в хімії та технологіях. Тези доп. Черкаси, 2008. С. 169–170.

References

1. Svoystva konstruktsionnykh materialov na osnove ugleroda: spravochnik / pod red. V.P. Sosedova. Moskva : Metallurgiya, 1975. 335 s.

2. Bushuev Yu.G., Persin M.I., Sokolov V.A. Uglerod-uglerodnye kompozitsionnye materialy : spravochnik. Moskva : Metallurgiya, 1994. 128 s.

3. Meleshko A.I., Polovnikov S.P. Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity. Moskva : SAYNS-PRESS, 2007. 192 s.

4. Karpenko A.V. Nauchnye osnovy polucheniya nizkoplotnykh materialov metodom razliva vodnykh suspenziy. *Spetsial'nye voprosy khimiy i khimicheskoy tekhnologiy*. 2006. No 5. S. 138–142.

5. Volkov S.D., Stavrov V.P. Statisticheskaya mekhanika kompozitnykh materialov. Minsk : BGU, 1978. 206 s.

6. Sokolkin Yu.V., Skachkov V.A., Tankeeva M.G. Issledovanie protsessov deformirovaniya i razpusheniya kompozitnykh materialov i konstuktsiy pri slozhnom nagruzhennom sostoyanii. Mekhanika konsruktsiy iz kompozitsionnykh materialov. Novosibirsk : Nauka, 1984. S. 97–101.

7. Skachkov V.O., Karpenko G.V., Gritsay V.P., Ivanov V.I., Karpenko N.O. Modelyuvannya protsesu karbonizatsii vugletsevykh kompozytsiynykh materialiv z utvoryuvachamy por. *Metalurgiya. Naukovi pratsi ZDIA,* 2005. Iss. 12. S. 80–86.

8. Skachkov V.A., Karpenko V.D., Karpenko A.V., Nesterenko T.N. Modelirovanie protsessov sokarbonizatsii uglerodnykh kompozitsionnykh materialov s poroobrazovatelyami : materialy i pokrytiya v ekstremal'nykh usloviyakh: issledovaniya, primenenie, ekologicheski chistye tekhnologii proizvodstva i utilizatsii izdeliy. Trudy konferentsii. Katsiveli-Ponizovka, 13-17.09.2004. S. 61.

9. Skahkov V.A., Karpenko A.V., Gtitsay V.P., Pechennikova V.M. Izmenenie svoystv uglerodnykh kompozitov s poroobrazovatelyami v protsesse karbonizatsii. Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov : sbornik dokladov 6-y mezhd. konferentsii. Khar'kov, 2005. S. 75–76.

10. Skahkov V.A., Karpenko A.V., Fil'chenkov A.S. Model' protsessa karbolizatsii uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala. Kompyuterne modelyubannya v khimii ta tekhnologiyakh : tezy dop. Cherkasy, 2008. S. 169–170.

Skachkov Victor, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0002-4447-4641

Karpenko Ann, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0003-3504-0283

Nesterenko Tetiana, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0001-7900-8512

Kirichenko Oleksij, head of department, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0002-3032-1919

Rumyantsev Volodyslav, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0003-3182-2536

Volyar Roman, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university. ORCID: 0000-0003-3182-2536

EXPERIMENTAL AND CALCULATION RESEARCH OF CARBONATING FOR LOW-DENSITY CARBON COMPOSITES AT THERMO-CHEMICAL TREASON OF THERE COMPONENTS

During carbonating of carbon composites there are difficult physical and chemical transformations to the volume of polymeric matrix and pores-forming with formation of coke remain, and also secreting of gaseous volatiles of different chemical composition. It is set, that volumetric and linear contractions of phenol-formaldehyde resin during carbonating have three characteristic temperature in-tervals. During carbonating of resin to temperature 673 K there is an insignificant increase of values of contraction, with the increase of temperature to 873 K the sharp increase of its values is fixed, and at the subsequent increase of temperature to 1073 K the change of contraction has more smooth character. Results of determination of the modules of elasticity of fibred materials and made foam powder of phenol-formaldehyde resin are showed, that its size with the increase of temperature gradually diminishes and at temperature 1200 K has a permanent and minimum size practically. Experiments by determination of strength descriptions of components of suspension allowed to ascertain that with increase of temperature the gradual lowering of the there descriptions of components suspensions which at a temperature 1273 T become sufficient for providing of durability of eventual material. The change of contraction for low-density carbon composites is conditioned by thermo-chemical transformations, what be going on with its components in the process of carbonating. To the temperature 500 T there are changes in pore-forming materials with a further increase temperatures begin to be distinguished gaseous matters are a result of transformation of matrix material (phenol-formaldehyde resin) in the polymer of the reticulated structure. Durability of composites in the process of carbonating sharply changes at a temperature higher 400 T and arrives at the maximal value ~ 1.2 МПа at a temperature 900 K.

Keys words: carbon composites, polymeric matrix, pore-forming material, carbonating, volumetric and linear contractions, module of resiliency, description of durability, experimental and calculation researches

Стаття надійшла: 23.04.2021 р.